
Gestion de contraintes et d'objets dans l'ordonnancement manufacturier

Clément GUERIN et Jean-Michel HOC

IRCCyN – Campus de l'Ecole Centrale de Nantes.
1, rue de la Noë – BP 92101 – F44321 Nantes Cedex 03.

Clement.Guerin@irccyn.ec-nantes.fr

Jean-Michel.Hoc@irccyn.ec-nantes.fr

Catégorie de soumission : communication longue

RÉSUMÉ

Cette recherche est une contribution méthodologique et théorique à l'étude des activités de planification et d'ordonnancement. Peu d'études ont été consacrées à la description de l'expertise en ordonnancement, et encore moins aux représentations qui sont manipulées. On a demandé à dix étudiants et six professionnels de la gestion de production de concevoir un ordonnancement manufacturier sous forme de Diagramme de Gantt (DG). On pense que l'activité d'ordonnancement s'articule autour d'espaces duaux : celui des contraintes, représentations mentales non visibles sur le DG, et celui des objets, représentations externes, visibles sur le DG. À partir du codage des protocoles verbaux et des actions des participants, nous avons observé que les professionnels (experts) ont tendance à privilégier les objets pour soutenir leur activité. Les étudiants (novices) donnent l'impression d'avoir davantage de difficultés à gérer les contraintes du problème. De plus, une différence liée à l'expertise a été observée pour certaines activités dites stratégiques (gestion des buts et violation de contrainte).

MOTS-CLÉS

Expertise, Ordonnancement, Gestion de contraintes et d'objets, Systèmes de Représentation et de Traitement.

1 INTRODUCTION

L'ordonnancement est une activité présente dans de nombreux secteurs : hospitalier (affectation du personnel à des équipes de soin), universitaire (affectation d'étudiants à des salles), industriel (affectation de tâches à des machines). Dans l'industrie, cette question est cruciale car un mauvais ordonnancement peut considérablement accroître les coûts de fabrication et réduire la compétitivité d'une entreprise. Ces enjeux économiques justifient que la recherche opérationnelle soit déjà très active dans la conception d'outils d'automatisation de l'activité. Or, il existe des situations où les opérateurs humains jouent un rôle crucial dans les décisions finales d'ordonnancement, notamment car ils disposent de connaissances non « informatisables » (Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004). Dans une perspective ergonomique d'assistance à l'ordonnancement humain, une connaissance plus générale de la nature de l'expertise est nécessaire, car peu d'études empiriques existent (Sanderson, 1989 ; Hoc, Mebarki, & Cegarra, 2004), et les études de terrain sont souvent menées auprès d'un seul ordonnanceur (Cegarra, 2008). Bien que plusieurs travaux se soient déjà intéressés aux procédures humaines d'ordonnancement (Sanderson, 1989, 1991), nous avons adopté le point de vue complémentaire des représentations manipulées : contraintes et objets. Enfin, pour avoir une vision plus globale de l'activité d'ordonnancement, nous avons examiné les activités stratégiques mises en œuvre par les opérateurs.

2 CADRES THEORIQUES

2.1 Gestion de contraintes et d'objets dans l'ordonnancement manufacturier

On définit l'ordonnancement par l'affectation temporelle de ressources à des tâches en tenant compte de **contraintes à satisfaire**, et d'objectifs de performance à atteindre (Esquirol & Lopez,

1999; Kiewiet, Jorna, & van Wezel, 2005). Dans le domaine industriel, on affecte des machines à des commandes (ou Ordres de Fabrication - OF) en cherchant à maximiser l'utilisation de ces machines et à minimiser les retards, par le respect de contraintes principalement temporelles (par ex. : durée d'une opération, date de livraison d'un OF). Bien que la notion de contrainte apparaisse comme centrale dans cette activité, la littérature sur l'ordonnancement humain ne l'a pas encore formalisé. Les travaux sur la résolution de problème en général (Richard, Poitrenaud, & Tijus, 1993) et de conception en particulier (Stefik, 1981 ; Hoc, 1987 ; Darses, 1991 ; Visser, 2006) ont déjà identifiés et modélisés l'activité de gestion de contraintes. Par ailleurs, plusieurs tentatives ont été faites pour définir cette notion de contrainte (Chevalier & Cegarra, 2008). Nous avons choisi la proposition de Stefik (op. cit.), selon laquelle une contrainte est une **relation entre variables permettant de décrire partiellement un objet**. Une contrainte peut être formulée, propagée ou satisfaite. Dans le prolongement de l'auteur, et en s'appuyant sur le cadre théorique de la résolution de problème de conception, on se propose de distinguer deux représentations manipulées au cours l'ordonnancement : contrainte et objet.

Au cours de la résolution d'un problème de conception, le sujet se représente la tâche comme la construction d'une représentation détaillée du but, en s'appuyant sur des changements de représentation (Simon & Lea, 1974). Les contraintes initiales du problème (celles du cahier des charges) sont souvent exprimées dans des **Systèmes de Représentation et de Traitement (SRT** : Hoc, op. cit.) différents de celui requis par la solution. Dans la conception architecturale par exemple, il est difficile de coordonner l'ensemble des contraintes du cahier des charges dans le SRT du but à atteindre (par exemple, une représentation spatiale tri-dimensionnelle du bâtiment – Lebahar, 1983). Pour le cas particulier du problème d'ordonnancement manufacturier, plusieurs auteurs ont mis en évidence la nécessité pour l'ordonnanceur de satisfaire une multiplicité de contraintes (SRT), dont les origines peuvent être variées. Certaines sont communes à la plupart des ateliers, c'est le cas de la capacité limitée des machines, des durées de traitement ou des dates de livraison (Fox, 1990), alors que d'autres sont spécifiques à une situation, comme le caractère périssable de certains produits (Akkerman & Donk, 2009), des machines sensibles à la température et à l'humidité ce qui affecte leur fonctionnement (McKay, Safayeni, & Buzacott, 1988), ou des interactions sociales entre opérateurs qu'il faut considérer (McKay, Buzacott, Charness, & Safayeni, 1992). **Toutes ces caractéristiques peuvent être vues comme des systèmes de contraintes ou SRT que l'ordonnanceur doit coordonner pour produire un ordonnancement.** Par ailleurs, le SRT requis est généralement le Diagramme de *Gantt* (DG - figure 1), dont chaque segment (objet) est proportionnel à la durée d'une opération d'un OF. En termes de contrainte et d'objet, le DG permet à des objets de représenter la satisfaction des contraintes liées à la durée des opérations mais ne permet pas, par exemple, de représenter la contrainte liée à la date de livraison de chaque OF. On définit alors **la contrainte comme une relation entre variables qui ne peut être représentée dans le DG, alors que l'objet est une contrainte satisfaite pouvant y être représentée.**

2.2 L'expertise

De nombreux travaux en psychologie cognitive s'accordent sur des caractéristiques générales de l'expertise : elle est liée à l'expérience et est spécifique à un domaine (Chi, Glaser, & Farr, 1988 ; Ericsson & Smith, 1991). Par ailleurs, avec l'expertise, l'humain a de moins en moins besoin d'informations externes pour guider son activité (Hoc & Amalberti, 2007). A partir de mécanismes de coordination internes liés à l'expertise, le contrôle de l'activité fait de moins en moins appel à ces informations, permettant par exemple à l'humain de marcher les yeux fermés. Cependant, de manière contradictoire, l'expertise serait caractérisée par un guidage s'appuyant sur des informations de l'environnement qui invitent à l'action. En étendant le concept d'affordance proposé par Gibson (1979), Hoc et Amalberti (op. cit.) proposent que l'expert contrôle son activité à partir de la perception de tout signal de l'environnement lui suggérant une action. Ces affordances expertes seraient le produit d'une longue période d'entraînement. **Sur un DG, l'objet jouerait un rôle d'affordance en invitant l'expert à les manipuler, et ainsi leur permettre d'externaliser une partie de leur cognition.** Cette proposition est cohérente avec d'autres travaux qui ont montré que la cognition ne dépend pas seulement de représentations internes mais repose aussi sur des représentations externes présentes dans l'environnement (Zhang & Norman, 1994 ; Hutchins, 1995 ; Scaife, & Rogers, 1996). Pour Zhang et Norman (op. cit.), plusieurs propriétés caractérisent les représentations externes, caractéristiques

compatibles avec la notion d'objet: fournir des aides à la mémorisation, fournir de l'information directement utilisable sans passer par des interprétations profondes, soutenir et structurer le comportement cognitif, et faciliter la tâche.

Par ailleurs, c'est parce qu'il dispose de **capacités d'abstraction** plus importantes, que l'expert planifie en privilégiant une stratégie descendante d'élaboration de plan, par raffinement progressif d'un plan abstrait (Hoc, 1987). Au cours de l'ordonnancement, les plans, définis comme des représentations schématiques et/ou hiérarchisées susceptible de guider l'activité, sont des buts que l'opérateur cherche à particulariser. Enfin, c'est parce qu'il dispose de **connaissances plus nombreuses** que l'ordonnanceur expert est capable de modifier la structure des problèmes, en relâchant par exemple des contraintes (Higgins, 1996), voire en violant certaines d'entre elles (Girin & Grosjean, 1996), dans le but d'atteindre les critères de performance de l'entreprise (McKay, Safayeni, & Buzacott, 1995).

3 HYPOTHESES DE RECHERCHE

Cette étude cherche à **décrire l'expertise en ordonnancement** selon deux niveaux d'analyse : le niveau tactique, défini par la gestion de contraintes et d'objets, et le niveau stratégique, caractérisé notamment par la gestion de but.

Puisque les experts sont capables d'externaliser leur cognition, on s'attend à ce qu'ils privilégient le traitement des objets représentés dans le système de représentation et de traitement de la solution : le diagramme de Gantt. De plus, l'expertise étant caractérisée par un plus grand répertoire de plans et de critères d'évaluation de ces plans pour les tester, on s'attend à observer une différence dans la gestion des buts (formulation et évaluation). Enfin, puisque l'expert dispose de suffisamment de connaissances pour pouvoir modifier la structure d'un problème, on s'attend à ce qu'il relâche ou viole certaines contraintes pour sortir de situations d'impasse.

4 METHODE

4.1 Participants et tâche expérimentale

Nous avons comparé l'activité d'ordonnancement de **dix-huit participants répartis en deux groupes**. Les novices étaient dix étudiants d'IUT en gestion de production disposant de connaissances théoriques sur l'ordonnancement et ses méthodes (règles d'ordonnancement, concepts, etc.), et ayant fait un stage en entreprise d'une durée de quatre mois. Les experts étaient six anciens étudiants de l'IUT avec une expérience professionnelle moyenne de plus de dix ans, pas nécessairement liée à l'utilisation quotidienne de DG, bien que très familiers avec ce mode de représentation. Quoiqu'il en soit les experts disposent de connaissances liées aux conditions réelles de fonctionnement des ateliers.

La tâche proposée, un cas d'école, se déroulait en deux étapes. Tout d'abord, les participants devaient **ordonnancer six OF** d'une chaîne de fabrication de cadres de vélos pour hommes et femmes. La conception du cadre était définie par trois opérations successives (découpage, soudure, peinture) caractérisées par une durée propre, et pour chaque OF était indiquée une date de livraison. Par ailleurs, on induisait l'apparition d'aléas sous la forme de périodes de maintenance pour lesquelles ni les durées, ni les machines concernées n'étaient précisées. Le participant devait ordonnancer selon deux objectifs : **maximiser la productivité et minimiser les retards**. Une fois cette première étape terminée, des informations concernant les périodes de maintenance étaient fournies. La tâche était alors d'effectuer un réordonnancement pour considérer ces périodes de maintenance impliquant l'arrêt des machines. Pour les aider dans cette tâche, les participants devaient utiliser le logiciel d'assistance à l'ordonnancement LEKIN®, leur permettant de produire un diagramme de Gantt (DG - figure 1). Plusieurs formats de représentation d'un ordonnancement sous forme de DG existent (Gibson et Laios, 1978), mais l'usage est de représenter l'occupation des machines en fonction du temps, permettant de visualiser les opérations sous forme de segments de longueur proportionnelle à leur durée. Enfin, l'utilisation de LEKIN® devait être faite sur un mode manuel, autorisant le participant à modifier les séquences d'OF autant de fois que nécessaire, en déplaçant les opérations avec la souris d'ordinateur.

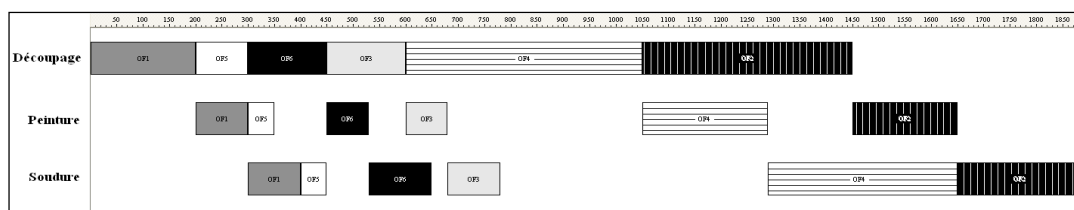


Figure 1 : Exemple de DG à partir du logiciel LEKIN®. Chaque OF est défini par trois opérations.

4.2 Méthode de recueil et de traitement des données

4.2.1 Actions sur le diagramme de Gantt (DG) et verbalisations simultanées à la tâche

L'accès à la gestion des objets s'est appuyé sur l'enregistrement des **actions visibles sur le DG** (déplacement des opérations de chaque OF). En revanche, l'accès à la gestion des contraintes et aux aspects stratégiques (formulation et évaluation de but) s'est basé sur les **verbalisations simultanées** à l'exécution de la tâche. Nous avons utilisé une consigne de type « *dites à haute voix ce qui vous passe par la tête en exécutant la tâche* », même si cela pouvait paraître décousu ; l'essentiel étant d'exécuter la tâche. Ce type de consigne permet de « vider » la mémoire à court terme, avec le moins possible de traitement supplémentaire (Ericsson & Simon, 1984 ; Hoc & Leplat, 1983).

4.2.2 Schème de codage

Nous avons codé deux niveaux de l'activité – tactique et stratégique – en utilisant le formalisme prédicat arguments (un prédicat code une **activité cognitive** ou un **comportement**, et les arguments spécifient cette activité ou ce comportement – Hoc & Amalberti, 1999).

Les opérations tactiques caractérisent des espaces duaux : l'espace des contraintes, celui des objets et leur articulation (figure 2).

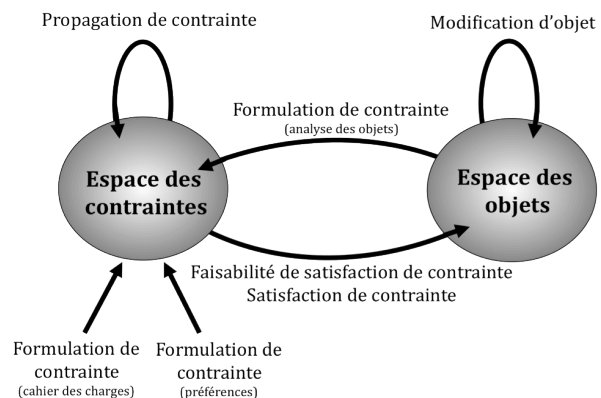


Figure 2 : Espaces duaux.

- **Formulation de contrainte** : introduire une nouvelle contrainte par la mise en relation de variables (Stefik 1981, Meseguer 1989). Les variables qui peuvent être mises en relation sont la commande (OF1 à OF6), la machine (découpage, peinture, soudure) et la période (date de livraison, date de fin, durée, ordre dans la séquence, etc.) Les contraintes formulées peuvent avoir trois origines : prescrite par le cahier des charges (« *La date de livraison de l'OF1 est 400* »), introduite par le concepteur (« *Je préfère mettre les petits OF au début* »), ou déduite de l'analyse des objets du DG (« *En déplaçant la découpe de l'OF2, je vois que l'OF1 est en retard* »).
- **Propagation de contraintes** : créer une nouvelle contrainte dépendante de l'expression de contraintes antérieures (Stefik 1981, Meseguer 1989). C'est une combinaison de contraintes, déduite de contraintes antérieures. Par exemple, « *l'OF1 doit être livré à 400 et il dure 400 donc je suis obligé de le mettre en premier* » : deux formulations de contrainte (date de livraison de l'OF1 et durée de l'OF1) créent une nouvelle contrainte (ordre de l'OF1 dans la séquence).
- **Satisfaction de contrainte** : associer à des variables des valeurs acceptables pour former une combinaison valide dans le processus de conception (Stefik 1981, Meseguer 1989). Le concepteur bascule de l'espace des contraintes vers celui des objets pour trouver un objet qui satisfait la contrainte. Cette opération peut être verbalisée, mais est généralement inférée à partir du comportement puisqu'elle est liée à une gestion des contraintes antérieure (formulation ou propagation). Par exemple, si par propagation l'ordonnanceur crée la contrainte que l'OF1 doit être planifié en premier dans le DG, et qu'il exécute des actions dans ce sens, on codera également une satisfaction de contrainte.
- **Faisabilité de satisfaction de contrainte** : s'interroger sur l'existence d'un objet du DG qui satisfait une contrainte. Dans la tâche, cette activité est apparue au cours du réordonnancement, au moment de l'introduction des périodes de maintenance. Par exemple « *La machine de soudure doit être interrompue pour la maintenance entre la date 600 et 800. Et là j'ai mon OF2 qui me gêne* » est une verbalisation reflétant une non-faisabilité de satisfaction de contrainte.

- **Modification d'objet** : ce comportement est codé lorsque l'ordonnanceur déplace au moins une opération d'OF. On distingue les déplacements justifiés par la satisfaction d'une contrainte, les déplacements justifiés par un travail sur les objets (« *je vais mettre l'OF2 devant l'OF3 pour voir ce que ça donne* »), et les déplacements sans justification.

Le schème de codage a permis également de coder plusieurs activités stratégiques dont :

- **Formulation de but** : formulation d'un but à atteindre, par exemple minimiser la durée totale de l'ordonnancement.
- **Évaluation de but** : évaluation du but atteint suite à une ou plusieurs actions. L'évaluation se fait à partir d'une propriété de l'ordonnancement. Par exemple « *Là, la durée maximale a baissé de 110 minutes* » est une évaluation dont le critère est la durée totale de l'ordonnancement.
- **Violation de contrainte** : supprimer une contrainte pour ne plus la considérer dans l'ordonnancement. Même si ce sont des contraintes en jeu dans cette activité, la violation de contraintes est une activité stratégique de redéfinition de la tâche.

5 RESULTATS

5.1 Analyse des activités tactiques : la gestion des contraintes et des objets

Nous représentons le pourcentage des opérations de gestion de contraintes et d'objets dans les espaces duaux, en distinguant la phase d'ordonnancement et celle de réordonnancement.

Au cours de l'ordonnancement (figure 3), les novices ont produit en moyenne 47 opérations de gestion de contraintes et d'objets et les experts ont produit 51 opérations. Le travail dans l'espace des objets est majeur, quelque soit le niveau d'expertise (47.6% contre 9.3%). De plus, on remarque que les novices ont propagés plus de contraintes que les experts ($d=13.6-5.0=8.6\%$; $t(14)=2.46$, $p<.03$; $\delta>3.9$: conclusion fiduciaire d'effet notable) alors que les modifications d'objet ont été plus nombreuses chez les experts par rapport aux novices ($61.4-33.7=27.7\%$; $t(14)=2.23$, $p<.05$; $\delta>11.0$).

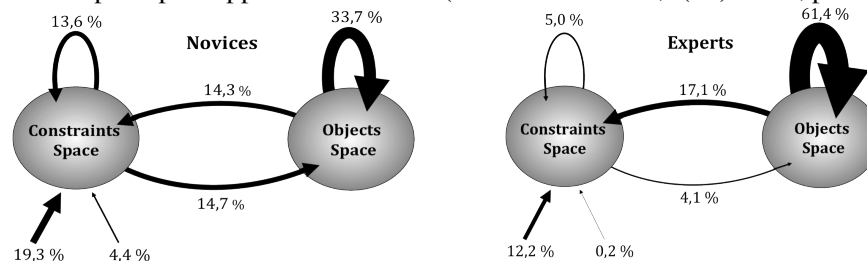


Figure 3 : gestion de contraintes et d'objets chez les novices et les experts au cours de l'ordonnancement.

Au cours du réordonnancement (figure 4), les novices ont produit en moyenne 76 opérations de gestion de contraintes et d'objets alors que les experts en ont produit seulement 38. Contrairement à la phase d'ordonnancement, le travail dans l'espace des objets n'est pas majoritaire alors que les formulations de contraintes prescrites (35,9% et 41,0%) et les opérations de satisfaction et de faisabilité (29,6% et 28,2%) le sont. La seule différence généralisable entre experts et novices concerne la propagation de contraintes plus importante chez les novices ($d=6,1-1,3=4,8\%$; $t(14)=2.59$, $p<.02$; $\delta>2.3\%$).

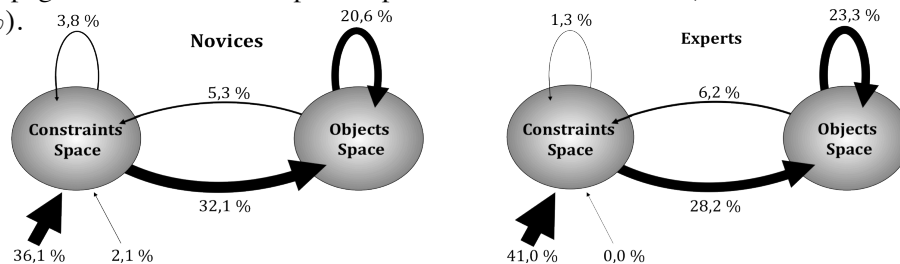


Figure 4 : gestion de contraintes et d'objets chez les novices et les experts au cours du réordonnancement.

5.2 Analyse des activités stratégiques

5.2.1 Activités stratégiques VS activités tactiques

L'analyse précédente s'est focalisée sur la dimension tactique de l'activité d'ordonnancement en termes de gestion de contraintes et d'objets dans des espaces duaux. Lorsque l'on examine la part des activités stratégiques face aux activités tactiques (tableau 1), on remarque qu'elle est plus importante chez les experts que chez les novices aussi bien pour la phase d'ordonnancement (43,7% contre 32,4%, pour des effectifs moyens respectifs de 90 et 69 opérations) que pour celle de réordonnancement (21,0% contre 10,6%, pour des effectifs moyens respectifs de 47 et 85 opérations). Toutefois les inférences d'un effet notable en faveur de l'expertise ne sont généralisables à la population que pour la phase de réordonnancement ($d=21,0-10,6=10,4\%$; $t(14)=3.03$, $p<.01$; $\delta>5.8\%$).

Tableau 1 : pourcentage des activités stratégiques chez les novices et les experts au cours de l'ordonnancement et du réordonnancement.

	Novices		Experts		Effet observé (d)	Test t ($\alpha=.05$)	Effet dans la population (δ)
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type			
Ordonnancement	32.4	18.4	43.7	20.9	11.3	$t(14)=1.13$; $p>.27$; NS	$P(\delta>2.1)=.90$
Réordonnancement	10.6	7.5	21.0	4.7	10.4	$t(14)=3.03$; $p<.01$; S	$P(\delta>5.8)=.90$

5.2.2 Gestion des buts et violations de contrainte

Une analyse en composante principale (ACP) nous a permis de mettre en évidence un premier facteur pour la phase d'ordonnancement et un autre pour la phase de réordonnancement. Concernant la phase d'ordonnancement le facteur est bipolaire (contribution de 41%) et est défini par deux classes d'activités : les opérations tactiques de gestion de contraintes (formulation, propagation et satisfaction de contrainte) et les opérations stratégiques de formulation et d'évaluation de but, auxquelles l'expertise est corrélée. Concernant la phase de réordonnancement le facteur est également bipolaire (contribution de 25%) et est défini par deux classes d'activités : des opérations tactiques de gestion de contraintes (propagation et satisfaction de contrainte) et l'opération stratégique de violation de contrainte, à laquelle l'expertise est corrélée.

5.2.3 Types de buts formulés

L'ACP nous a permis de mettre en évidence des activités de formulation et d'évaluation de but au cours de l'ordonnancement, et qui sont liées à l'expertise. Si l'on examine plus particulièrement les types de but formulés (tableau 2), on remarque que quatre types de buts sont formulés aussi bien chez les novices que chez les experts (pour une moyenne de 3,3 buts formulés par novice et de 4,7 buts formulés par expert) : minimiser la durée totale de réalisation de l'ordonnancement, minimiser les retards, minimiser les temps d'attente entre les opérations, et introduire des marges pour anticiper les périodes de maintenance. Parmi ces buts, seul le fait de minimiser les temps d'attente permet de distinguer les deux groupes de participant, avec un pourcentage plus important pour les experts ($d=46,8-13,7=33.1\%$; $t(14)=2.53$, $p<.03$; $\delta>15.6\%$).

Tableau 2 : pourcentage des types de buts formulés par les novices et les experts au cours de l'ordonnancement

	Novices		Experts		Effet observé (d)	Test t ($\alpha=.05$)	Effet dans la population (δ)
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type			
Minimiser la durée totale de réalisation de l'ordonnancement	36.5	22.0	19.4	22.2	17.1	$t(14)=1.50$; $p>.15$; NS	$P(\delta>1.8)=.90$
Minimiser les retards	26.3	30.4	17.4	15.5	8.9	$t(14)=0.66$; $p>.51$; NS	$P(\delta>9.2)=.90$
Minimiser les temps d'attente entre les	13.7	25.1	46.8	25.7	-33.1	$t(14)=-2.53$; $p<.03$; S	$P(\delta<-15.6)=.90$

opérations							
Introduire des marges pour anticiper la maintenance	13.5	19.2	16.4	34.3	-2.9	t(14)=-0.22 ; p>.83 ; NS	P(δ <23.8)=.90

6 DISCUSSION - CONCLUSION

Lorsque l'on décrit l'activité d'ordonnancement en termes d'activités tactiques de gestion de contraintes et d'objets, on observe que les novices travaillent plus que les experts dans l'espace des contraintes, notamment du point de vue des contraintes propagées. Ce résultat s'observe aussi bien dans la phase d'ordonnancement que de réordonnancement. De plus, une prédominance des experts sur les novices apparaît lorsqu'on compare les modifications d'objet, mais les résultats ne sont généralisables que pour la phase d'ordonnancement. Il semble donc que **les experts ont tendance à s'appuyer sur les objets**, représentations manipulées dans le SRT de la solution, pour produire l'ordonnancement demandé. Ce résultat, qui a également été observé dans la situation d'ordonnancement d'emploi du temps universitaire (Hoc, Guerin, & Mebarki, sous presse), nous paraît compatible avec le modèle du contrôle cognitif proposé par Hoc et Amalberti (2007). En effet, selon les auteurs, l'expertise est notamment caractérisée par le fait de s'appuyer sur des éléments de l'environnement pour soutenir l'activité mentale (contrôle cognitif externe). Les objets joueraient un rôle d'affordance en invitant l'expert à les manipuler, et en leur fournissant de l'information directement utilisable en diminuant le traitement des contraintes du problème (Zhang & Norman, 1994). En revanche, même si les novices travaillent aussi en majorité dans l'espace des objets, ils utilisent sans doute moins la dimension externe du contrôle cognitif. C'est pourquoi ils propagent et donc traitent plus de contraintes. Ce résultat montre que le SRT externe est un mode de représentation qui doit faciliter la résolution du problème d'ordonnancement grâce au soutien des représentations externes.

De plus, les résultats de l'ACP nous permettent de mettre en évidence une autre dimension de l'expertise, plus stratégique : la gestion des buts en lien avec la capacité d'abstraction des plans. Au cours de l'ordonnancement, les experts produisent plus de formulation et d'évaluation de but, en cherchant principalement à minimiser les temps d'attente entre les ordres de fabrication. Le traitement de ce but est probablement lié à une meilleure connaissance des conditions de production, et aux objectifs de performance industrielle (maximiser la productivité). Par ailleurs, c'est l'activité de violation de contrainte qui semble être un marqueur d'expertise pour la phase de réordonnancement. Rappelons que dans cette phase, il s'agissait pour le participant d'introduire quatre périodes de maintenance en créant des espaces vides entre les OF. L'introduction de ces contraintes prescrites a montré une augmentation de formulation, de satisfaction et de faisabilité de satisfaction de contrainte par rapport à la phase d'ordonnancement quelque soit le niveau d'expertise. Ces résultats sont le reflet d'une difficulté à traiter ces contraintes supplémentaires tout en respectant par exemple les contraintes liées aux dates de livraison. Pour sortir de cette difficulté, et parce que les conditions de la tâche ne permettent pas de relâcher des contraintes en négociant par exemple les dates de livraison d'un OF ou les dates de maintenance d'une machine, l'expert choisit alors de violer les contraintes liées aux dates de maintenance, préférant respecter les dates de livraison des commandes. Ce comportement montre cette capacité de l'expert à modifier la structure d'un problème en redéfinissant la tâche, comme ils le feraient dans leur situation de travail réelle où les négociations de contraintes sont possibles. L'originalité principale de ce travail est de montrer que la propension, souvent décrite, des experts à s'attacher à la structure profonde des problèmes (voir par ex. : Chi et al, 1988) ne les empêche pas de se guider sur des représentations très concrètes, ce qui vient à l'appui du modèle de Hoc et Amalberti (2007).

7 BIBLIOGRAPHIE

- Akkerman, R., & van Donk, D.P. (2009). Analyzing scheduling in the food-processing industry. *Cognition, Technology & Work*, 11, 215-266.
- Chi, M., Glaser, R., & Farr, M. (Eds.). (1988). *The Nature of Expertise*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cegarra, J. (2008). A cognitive typology of scheduling situations: A contribution to laboratory and field studies. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9, 201-222.

- Chevalier, A., & Cegarra, J. (2008). Une approche psychologique de la notion de contrainte en résolution de problèmes. *Le Travail Humain*, 71, 173-198.
- Darses, F. (1991). The constraint satisfaction approach to design: A psychological investigation. *Acta Psychologica*, 78, 307-325.
- Ericsson, K.A., & Simon, H.A. (1984). *Protocol analysis: verbal reports as data*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ericsson, K.A., & Smith, J. (Eds.). (1991). *Toward a general theory of expertise*. New York : Cambridge University Press.
- Esquirol, P., & Lopez, P. (1999). *L'ordonnancement*. Paris : Economica.
- Fox, M.S. (1990). Constraint-guided scheduling - a short history of research at CMU. *Computers in Industry*, 14, 79-88.
- Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gibson, R., & Laios, L. (1978). The presentation of information to the job-shop Scheduler. *Human Factors*, 20, 725-732.
- Girin, J., & Grosjean, M. (Eds.) (1996). *La transgression des règles au travail*. Paris : L'Harmattan.
- Higgins, P.G. (1996). Interaction in hybrid intelligent scheduling. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 6, 185-203.
- Hoc, J.M., & Leplat, J. (1983). Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task. *International Journal of Man-Machine Studies*, 18, 293-306.
- Hoc, J.M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62, 97-129.
- Hoc, J.M., & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoc, J.M., Mebarki, N., & Cegarra, J. (2004). L'assistance à l'opérateur humain pour l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers. *Le Travail Humain*, 67, 181-208.
- Hoc, J.M., Guerin, C., & Mebarki, N. (in press). The nature of expertise in scheduling: the case of Timetabling. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*.
- Hutchins, E. (1995). *Cognition in the wild*. Cambridge, MA: MIT Press
- Kiewiet, D.J., Jorna, R., & van Wezel, W. (2005). Planners and their cognitive maps : an analysis of domain representations using multidimensional scaling. *Applied Ergonomics*, 36, 695-708.
- Lebahar, J.C. (1983). *Le dessin d'architecte*. Roquevaire: Editions Parenthèses.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1988). Job-Shop Scheduling Theory: What Is Relevant? *Interfaces*, 18, 84-90.
- McKay, K.N., Buzacott, J.A., Charness, N., & Safayeni, F.R., (1992). The Scheduler's Predictive Expertise. An Interdisciplinary Perspective. In G.I. Doukidis & R.J. Paul (Eds), *Artificial Intelligence in Operational Research* (pp.139-150). London: MacMillan Press.
- McKay, K.N., Safayeni, F.R., & Buzacott, J.A. (1995). 'Common Sense' realities of planning and scheduling in printed circuit board production. *International Journal of Production Research*, 33, 1587-1603.
- Meseguer, P. (1989). Constraint satisfaction problem: an overview. *AICOM*, 2, 3-17.
- Richard, J.F., Poitrenaud, S., & Tijus, C. (1993). Problem-solving restructuring: Elimination of implicit constraints. *Cognitive Science*, 17, 497-529.
- Sanderson, P.M. (1989). The human planning and scheduling role in advanced manufacturing systems: An emerging human factors domain. *Human Factors*, 31, 635-666.
- Sanderson, P.M. (1991). Towards the model human scheduler. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, 1, 195-219.
- Scaife, M., & Rogers, Y. (1996). External cognition: how do graphical representations work? *International Journal of Human-Computer studies*, 45, 185-213.
- Simon, H.A., & Lea, G. (1974). Problem solving and rule induction: a unified view. In L.W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 105-128). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- Stefik, M. (1981). Planning with constraints (MOLGEN : Part1). *Artificial Intelligence*, 16, 111-140.
- Visser, W. (2006). *The cognitive artifacts of designing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Zhang, J., & Norman, D.A. (1994). Representations in distributed cognitive tasks. *Cognitive Science*, 18, 87-122.